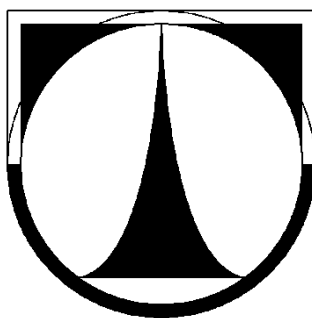


Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Karel Drátovník

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor : Strojírenství
Zaměření : Výrobní systémy

Porovnání efektivity prototypové výroby součástí

Comparison of the effectiveness of prototype production components

KVS - VS - 135

Karel Drátovník

Vedoucí práce : Ing. Petr Keller, Ph.D.

Počet stran: 38
Počet příloh: 1
Počet obrázků : 38
Počet tabulek : 13

V Liberci 24.5 2013



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Karel Drátovník
Studijní program	B2341 Strojírenství
obor	2301R030 Výrobní systémy
zaměření	výrobní systémy

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Porovnání efektivity prototypové výroby součástí

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Cílem práce je porovnat efektivitu prototypové výroby existujících součástí pomocí různých technologií. Výsledky řešené bakalářské práce jsou určeny k využití pro výuku a výzkumné práce na KVS.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Úvod, seznamte se s možnostmi výroby součástí na KVS - CNC obrábění, technologie RP a odlévání dílů ve vakuu.
2. Pro danou skupinu existujících součástí navrhnete postup výroby pomocí výše uvedených technologií.
3. Proveďte přípravu výroby v CAD/CAM systému EdgeCAM pro výrobu daných součástí na CNC soustružnicko-frézovacím centru a pomocí technologie RP.
4. Dále připravte výrobu součástí pomocí technologie odlévání dílů ve vakuu.
5. Porovnejte všechny způsoby výroby z hlediska nákladů a časové náročnosti a proveďte zhodnocení.



Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva v rozsahu cca 35 stran, včetně příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh, zdrojových souborů CAD/CAM dat návrhu bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu i kopie bakalářské práce.

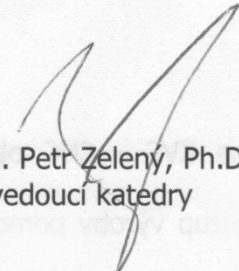
Seznam odborné literatury:

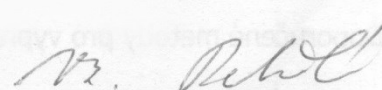
- [1] Dokumentace stroje Mazak Integrex 100 – IV
- [2] Manuály k CAD/CAM systému EdgeCAM
- [3] Keller, P. *Programování a řízení CNC strojů. Prezentace přednášek, 2.část.* KVS, FS, TU v Liberci. Liberec 2005
- [4] Manuály a výukové materiály ke strojům FDM – Dimension a Objet Connex 500
- [5] Dokumentace k vakuové komoře MK-Mini s příslušenstvím
- [6] Články v časopisech a na internetu

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Keller, Ph.D.




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 1. března 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

TÉMA: **Porovnání efektivity prototypové výroby součástí**

ANOTACE:

Cílem této bakalářské práce je porovnání efektivity prototypové výroby existujících součástí pomocí různých technologií.

V teoretické části je pojednáno o CNC obrábění na Mazak INTEGREX 100-IV, technologiích Rapid Prototyping: 3D tisk na Objet Connex 500 a Dimension SST 768 a odlévání dílů ve vakuu. Další část se zabývá navrhnutím postupu výroby součástí na uvedených technologiích.

V závěrečné části je provedeno porovnání výrobních časů a nákladů při výrobě jedné, tří a deseti sad součástí. Výsledky jsou zpracovány v přehledných tabulkách a grafech.

THEME: **Comparison of the effectiveness of prototype production components**

ANOTATION:

The aim of this bachelor thesis is Comparison of the effectiveness of prototype production components through various methods.

In the theoretical part is described CNC machining on machine Mazak INTEGREX 100-IV, technology Rapid Prototyping: 3D printing on Objet Connex 500 and Dimension SST 768 and vacuum casting. Next part deals with designing a production process of components on technologies listed above.

Last part contains comparison of production time and costs while producing one, three and ten components. The results are in well arranged tables and graphs.

Desetinné třídění :

Klíčová slova : Rappid Prototyping, CNC obrábění, 3D tiskárna, lití ve vakuu, Mazak INTEGREX 100-IV, Objet Connex 500, Dimension SST 768

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2013

Archivní označení zprávy :

Počet stran : 38

Počet příloh : 1

Počet obrázků : 38

Počet tabulek : 13

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24.5.2013

Podpis:

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl mockrát poděkovat všem, kteří mi při zpracování bakalářské práce pomáhali. V první řadě děkuji vedoucímu práce panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za jeho čas, vedení, rady a poskytnuté materiály. Samozřejmě děkuji za podporu nejbližší rodině a přátelům.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Teoretická část	11
2.1 CNC obrábění (na Mazak INTEGREX 100-IV).....	11
2.1.1 Frézování v pěti osách polohováním.....	11
2.1.2 Frézování v pěti osách souvisle.....	11
2.1.3 Mazak Integrex 100-IV	12
2.1.4. Systémy CAD/CAM	13
2.2. Technologie Rapid Prototyping (RP).....	14
2.2.1 Digitální model.....	14
2.2.2. Fyzický model	14
2.2.4. Objet Connex 500	15
2.2.5. Dimension SST 768	16
2.2.6 Odlévání dílů ve vakuu	17
3. Navržení postupu pro danou skupinu existujících součástí pomocí výše uvedených technologií.....	18
3.1. Výroba na CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV	18
3.1.1. Výroba dílu č. 1 - Základna (ø38mm x 10mm)	19
3.1.2. Výroba dílu č. 2 - střed (ø16mm x 7mm)	20
3.1.3. Výroba dílu č. 3 - Přítlačný kroužek (ø38mm x 4mm).....	20
3.1.4. Výroba dílu č. 4 - Držák(ø38mm x 13mm)	21
3.2. Výroba na Dimension STT 768	22
3.3 Výroba na Objet Connex 500.....	24
4. Příprava výroby součástí pomocí technologie odlévání dílů ve vakuu.....	25
4.1 Výroba formy:	25
4.2 Lití do formy	27
5. Porovnání všech způsobů výroby z hlediska nákladů a časové náročnosti a jejich zhodnocení.	29
5.1. CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV.....	29
5.1.1. Časová náročnost výroby součástí	29
5.1.2. Celková kalkulace výroby	30
5.2. Odlévání dílů ve vakuu	30
5.2.1. Časová náročnost výroby součástí:	30
5.2.2. Celková kalkulace výroby	31
5.3. 3D tisk na Dimension SST 768.....	31
5.4. 3D tisk Objet Connex 500.....	31

5.5. Celkové porovnání	32
5.5.1 Řazení dle časové náročnosti	32
5.5.2. Řazení dle cenové náročnosti výroby	34
6. Závěr	36
7. Literatura	37
8. Přílohy	38

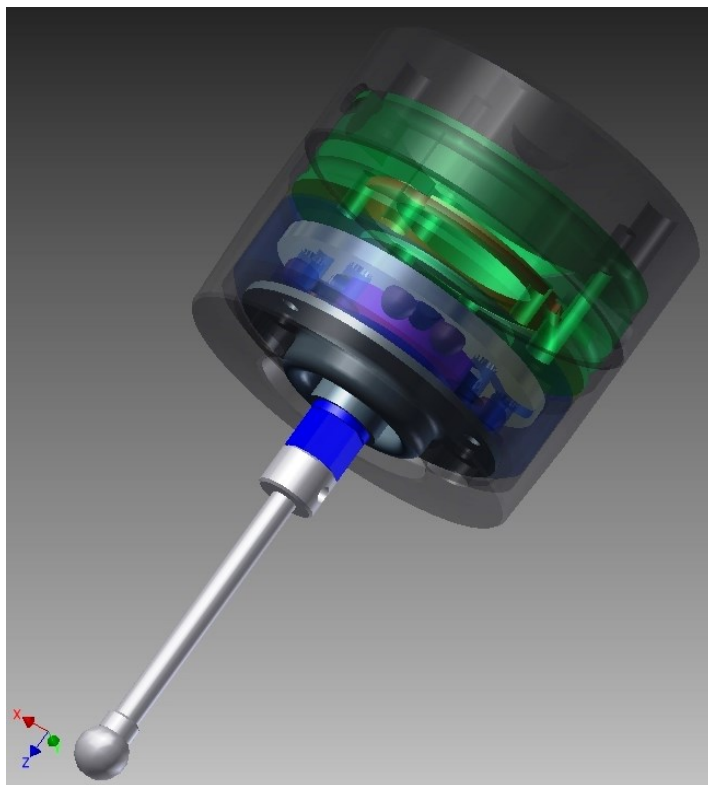
1. Úvod

Devadesát devět procent součástí je konstruováno na počítačovém softwaru, na něm pak můžou probíhat další úkony, které zajistí správnou funkčnost a požadovanou pevnost součástí - simulace. Teorie je však mnohdy jiná než praxe, teoretické simulování je potřeba ověřit na reálné součásti – prototypu.

Na prototypu je možné testovat nejrůznější zatížení, ověřit jeho funkčnost a vyladit design. Proces vývoje výrobku chceme dokončit v co nejkratším čase. Zároveň je zde požadavek na cenu (konkurenceschopnost). Čím dříve uvedeme výrobek na trh (před konkurencí), tím má větší šanci obstát na trhu.

Cílem této bakalářské práce je porovnání efektivity prototypové výroby existujících součástí pomocí různých technologií. Jako součásti byly zvoleny díly na odměřovací sondu používanou v CNC obráběcích centrech.

Součásti byly vyráběny na CNC obráběcím centru Mazak INTEGREX 100-IV, technologiích Rapid Prototyping: 3D tisk na Objet Connex 500 a Dimension SST 768 a odlévání dílů ve vakuu.



Obr. 1 Odměřovací sonda

2. Teoretická část

V následující části bude pojednáno v nezbytném rozsahu o CNC obrábění (na stroji Mazak INTEGREX 100-IV), o technologiích Rapid Prototyping: 3D tisku na Objet Connex 500 a Dimension SST 768 a odlévání dílů ve vakuu

2.1 CNC obrábění (na Mazak INTEGREX 100-IV)

Obrábění na CNC obráběcích strojích je perspektivní a vyhledávaná oblast, která je s úspěchem zaváděna do průmyslové praxe. Vyráběné součásti jsou velice kvalitní a přesné.

2.1.1 Frézování v pěti osách polohováním

Při tříosém frézování používá obráběcí stroj tři lineární osy – X, Y, Z. Při pětiosém polohovém obrábění používá stroj ještě další dvě osy rotační označované písmeny A, B, C podle toho, kolem které osy se otáčí. Toto obrábění je někdy označováno jako 3+2 obrábění.

Obrábění 3+2 používá tři lineární osy (ty jsou ovládány současně) a dvě osy rotační, pomocí nichž se hlava přesune na novou pozici a pak teprve může obrábět, jakmile je hlava v nové pozici, stroj vykonává klasické tříosé obrábění. Tento typ obrábění může pohybovat buď lineární osou, nebo osou rotační (nelze provádět oba pohyby najednou).[1]



Obr.2 Označování os [1]

2.1.2 Frézování v pěti osách souvisle

Obráběním pomocí souvislých (kontinuálních) pěti os můžeme současně vykonávat pohyb lineárních a rotačních os. Při pětiosém souvislém obrábění stroj může obrábět i tvary, které jsou v podkosu a nelze je tak vyrobit bez použití rotačních os (A, B, C). Většina dílů je vyrobena na jedno upnutí a může být zachován i totožný nulový bod obrábění. Osa nástroje se kontinuálně mění tak, aby nástroj mohl bez problému obrobit špatně dosažitelná místa (v podkosu), kvalita obrobení je na celém povrchu stejná. Při použití rotačních os může být také zmenšeno vyložení nástroje, zvýší se tím jeho tuhost a životnost, dále jsou zlepšeny řezné podmínky. [3]

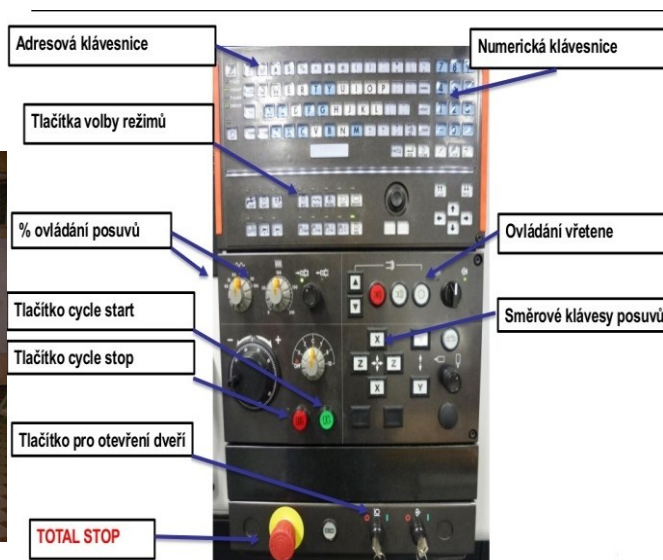
2.1.3 Mazak Integrex 100-IV

Mazak Integrex 100-IV je pětiosé soustružnicko-frézovací obráběcí centrum japonské firmy Mazak. Je využíváno zejména k obrábění tvarově složitých součástí např. forem, lopatek oběžných kol turbín a nástrojů.

Většina ploch může být obráběna na jedno upnutí, tím klesá čas potřebný pro manipulaci s obrobkem a zvyšuje se přesnost vyráběného dílu. Nástroj může být nakloněn k normále povrchu, tím je docílena lepší efektivita a součást se lépe obrábí. Kratší nástroje zvyšují tuhost stroje, snižují deformaci plochy, zajišťují lepší povrchovou úpravu a přesnost. [1]

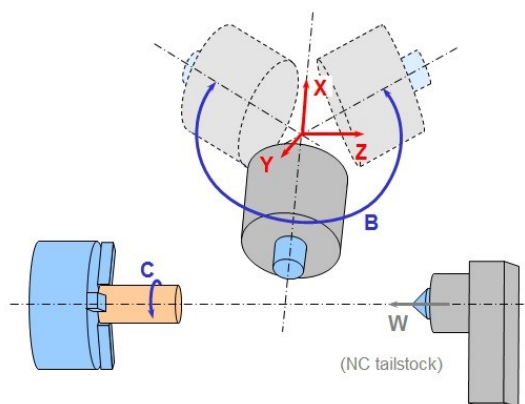


Obr. 3 Mazak Integrex 100-IV



Obr. 4 Ovládací panel [8]

Mazak Integrex 100-IV má toto označení os: X, Y, Z, B (rotace kolem Y), C (rotace kolem Z). Je mimo jiné vybaven měřicí sondou, měřícím okem a koníkem. Na obrázku 6 je velmi dobře patrné naklonění nástroje v ose B.



Obr. 5 Osy [9]



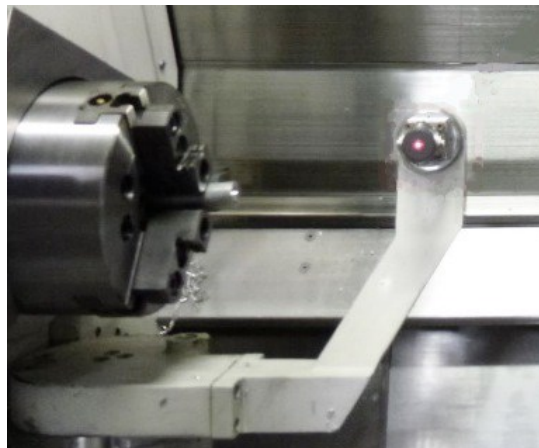
Obr. 6 Polohování nástroje [9]

Měřicí sondy pro CNC obráběcí centra jsou používány k identifikaci a ustavení obrobku, kontrolu rozměrů obrobku v průběhu obrábění a ověření konečných rozměrů hotového dílu před vyjmutím dílu ze stroje. [2]

Měřicí oka pro CNC obráběcí centra jsou používána k seřizování a měření nástrojů.



Obr. 7 Měřicí sonda [9]

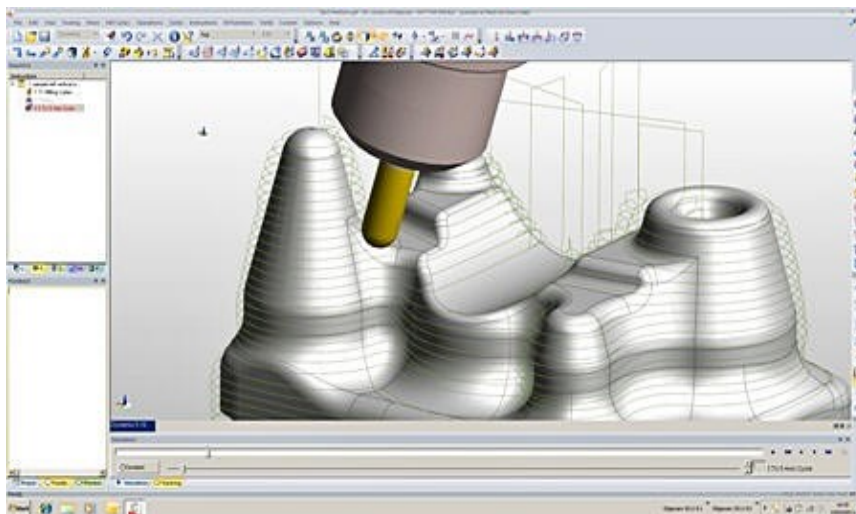


Obr. 8 Měřicí oko[8]

2.1.4. Systémy CAD/CAM

CNC stroje spolu s CAD/CAM systémy tvoří velice silnou dvojici ve výrobním procesu. CAD/CAM je počítačový systém, v kterém je možno součást nakreslit ve 3D (CAD) a z 3D modelu dále navrhnout jak součást vyrobit (CAM). Výstup CAM je NC kód, v něm jsou obsažené veškeré informace pro obrábění (dráhy nástroje, řezné podmínky).

Mezi největší přednosti CAD/CAM systémů patří jednoduché a intuitivní ovládání, možnost pracovat s externími CAD formáty (zachování tolerancí, návaznost ploch), optimalizace dráhy nástroje, upravování hotových operací, vytvoření vlastního post-procesoru, podpora práce v týmu a virtuální kontrola kolize. [4]



Obr. 9 Program EdgeCAM – dráhy nástroje [10]

2.2. Technologie Rapid Prototyping (RP)

Rapid Prototyping slouží k co nejrychlejšímu vytvoření prototypů a modelů. Vznikl v osmdesátých letech. Uplatňuje se především pro vývoj a výrobu forem a nástrojů. Modely vyrobené touto metodou jsou využívány k simulacím, různým typům zkoušek, k ověření vlastností budoucího výrobku. Výroba prototypů konvenčními technologiemi je většinou komplikovaná a zdlouhavá. Technologií RP je možné zkrátit čas potřebný na vývoj výrobku, snížení nákladů a celkové zvýšení kvality. Nejvíce je používán v automobilovém, leteckém, elektrotechnickém průmyslu a ve výrobě spotřebního zboží. [5]

Pro zavedení RP musíme počítat s poměrně vysokými investičními náklady, po správném implementování do procesu výroby se však počáteční investice rychle navrátí. Můžeme rychle vyrobit fyzický model a prezentovat jej na trhu v co nejkratším čase, čím dříve uvedeme výrobek na trh, tím máme větší možnost získat zákazníky. Kdo přijde s uvedením výrobku na trh pozdě, přijde o potenciální zákazníky. [5]

2.2.1 Digitální model

Nejprve je výrobek zkonstruován v CAD programu, data z CAD programu musí obsahovat úplné informace o geometrii tělesa (3D model). Data z CAD jsou převedena do formátu STL (STereoLithography), kde jsou plochy povrchu aproximovány pomocí trojúhelníků. Na nich závisí přesnost modelu (nastavení jemnosti detailů). Poté jsou vložena do softwaru pro ovládání stroje, v něm je možné nastavit parametry pro výrobu modelu (přesnost, rozložení na pracovní desce...), software si vygeneruje vše potřebné pro stavbu modelu a nakonec jsou tyto data odeslána do zařízení pro Rapid Prototyping, výroba může začít. [5]

2.2.2. Fyzický model

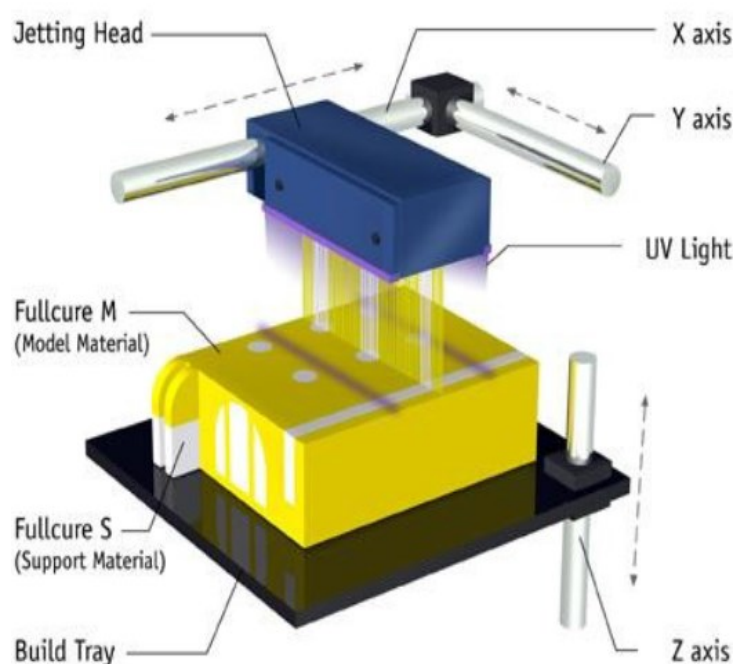
Fyzický model je vytvářen postupným přidáváním materiálu po jednotlivých vrstvách, k tomu jsou používána data, která přicházejí z počítače. Stroj pak model vrstvou po vrstvě sestaví. Mohou se takto vyrábět velice složité součásti s dutinami, žebry nebo se šikmými stěnami. [5]

2.2.4. Objet Connex 500

Objet Connex 500 je první 3D tiskárna, která je schopna dvoukomponentního tisku, tisk dvou materiálů najednou (PolyJet Matrix). Tloušťka jedné vrstvy je 16μm nebo 30μm. Pracovní prostor má rozměry 500 x 400 x 200mm. Je možné tisknout ze 14 druhů základních materiálů, které mají odlišné vlastnosti (pevnost, pružnost, tepelné zatížení, barevná rozmanitost), kombinací základních čtrnácti materiálů lze získat až sto druhů tzv. digitálních materiálů. [6]

Pracuje na principu Multijet printing, to znamená, že tisková hlava (podobná té z inkoustové tiskárny) nanáší vrstvičku tekutého foto-polymeru a UV lampa ji následně vytvrdí. Stůl sjede o tloušťku vrstvy dolů (16μm nebo 30μm), tento proces se opakuje. Objet Connex 500 disponuje celkem osmi tiskovými hlavami, čtyři „tisknou“ podpůrný materiál a 2 + 2 stavební materiál.

Součásti vyrobené na 3D tiskárnách většinou nejsou tvarově stále, často jsou náchylné k degradování, proto se nejvíce hodí zejména pro výrobu prototypů.



The Objet PolyJet Process

Obr. 10 Princip tisku [6]

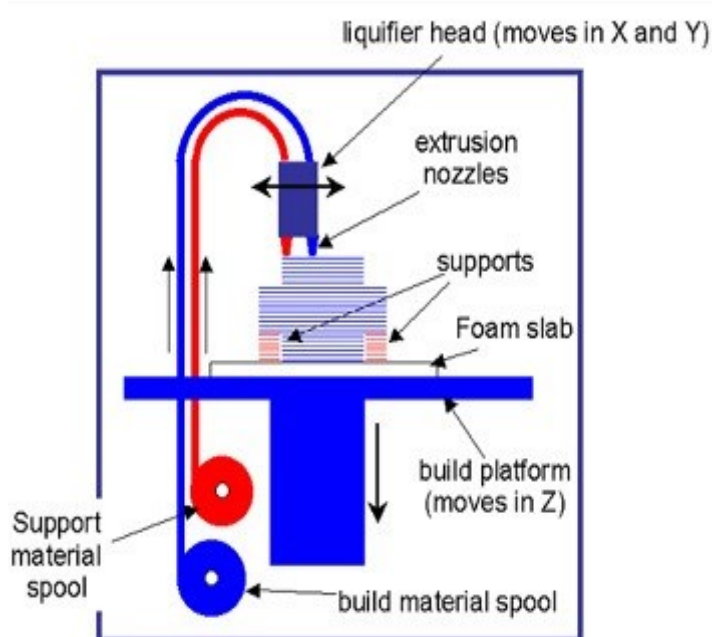


Obr. 11 Objet Connex 500 [11]

2.2.5. Dimension SST 768

Dimension STT 768 je 3D tiskárna pracující na principu FDM (Fused Deposition Modelling). Jako materiál je nejvíce používán ABS, ale také termoplasty a vosky. Materiál je přiváděn vláknem do vyhřívané trysky. V trysce je vlákno ohřáto na teplotu o 1°C vyšší než je jeho teplota tání. Po nanesení materiálu z trysky materiál zatuhne. Model vzniká nanášením těchto vrstev. Spolu s materiálem na tvorbu modelu může být také nanášen podpůrný materiál pro „podepření“ složitějších částí modelu. Vytvářený model může mít rozměry 203 x 203 x 305 mm. [5] [6]

Modely z ABS jsou pevné a snadno se povrchově upravují. Mohou být používány pro vizualizaci, testování, funkčnost sestavy a u mírně namáhaných dílů i jako funkční díly. Dále je lze použít pro zaformování do keramické skořepiny (metoda vytavitelného modelu), nebo jako master model pro výrobu silikonové formy. [6]



Obr. 12 Princip tisku [12]



Obr. 13 Dimension SST 768 [13]

2.2.6 Odlévání dílů ve vakuu

Do technologií Rapid Prototyping je též zařazeno odlévání dílů ve vakuu, používá se pro malé série (do 100 kusů) z polyuretanových pryskyřic. Vakuový lící systém nabízí jednoduchou metodu výroby plastových prototypů bez potřeby výroby drahých kovových nástrojů. Polyuretanové díly mohou být zhotoveny již během několika málo hodin. Lití je prováděno do forem ze silikonu. Pro výrobu dutiny formy (negativu požadovaného dílu) je použit master model. Master model je vlastně již existující požadovaný výrobek. [7]

Pro výrobu formy jsou nejčastěji používány silikonové kaučuky. Jsou lehce zpracovatelné, houževnaté, vytvrditelné, mají malé smrštění a dobrou rozměrovou stálost. Po vytvrzení jsou pružné a snadno je z nich vyjmut odlitek i s negativním zkosením. Jsou průsvitné, díky této vlastnosti může být lépe rozříznuta dělicí rovina, bez poškození master modelu. [7]

Pro odlévání do silikonových forem jsou mimo polyuretanových pryskyřic používány další materiály, jako např. vosk, sádra apod.. Vlastnosti polyuretanových pryskyřic závisí na typu a poměru pryskyřice a vytvrzovacího činidla, může být také přidán pigment pro změnu požadované barvy. Vlastnosti polyuretanových pryskyřic se snaží přibližovat těmto materiálům:

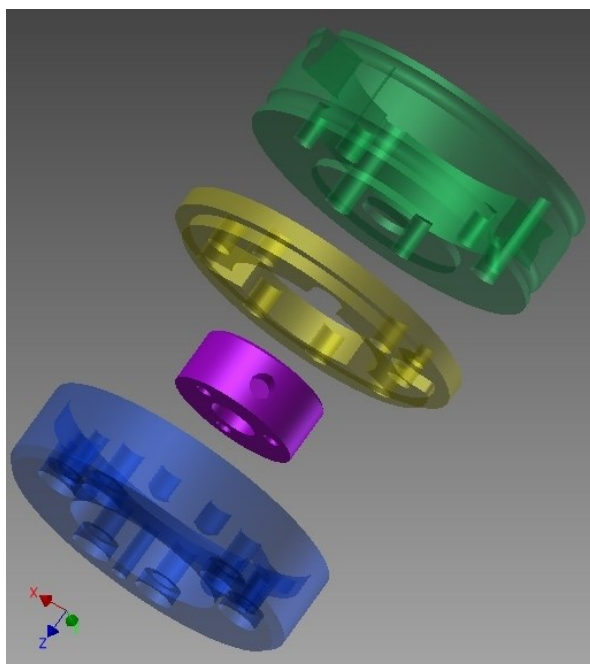
- PE (polyethylen) – hračky, mikroténové sáčky, elektrotechnická instalace
- ABS (akrylonitrilbutadienstyren) – spotřební průmysl
- PP (polypropylen) – textilní průmysl, obalový průmysl
- PS (polystyren) – izolace, spotřební průmysl
- PA (polyamid) – textilní průmysl
- PMMA (polymethylmetakrylát) – plexisklo
- PC (polykarbonát) – stavebnictví
- POM (polyoxymethylen) – strojírenství (vodící kroužky, pouzdra, atd.)
- PEEK (polyetereterketon) – strojírenství (tyče, trubky, ozubená kola, atd.) [7]

V praxi se často používá kombinace těchto materiálů: PE+PP, ABS+PS atd., kombinací materiálů je docíleno celkové zlepšení jejich vlastností (pevnost, rázová houževnatost, tepelná odolnost). [7]

3. Navržení postupu pro danou skupinu existujících součástí pomocí výše uvedených technologií.

V této bakalářské práci je řešena výroba součástí pro odměřovací sondu používanou zejména v CNC obráběcích centrech. CAD data sloužila jako vstup pro tuto práci. Na obrázku 14 jsou vyobrazené součásti vyráběné v této bakalářské práci, jedná se o:

- díl č. 1 - Základna ($\varnothing 38\text{mm} \times 10\text{mm}$) - modrý díl
- díl č. 2 - Střed ($\varnothing 16\text{mm} \times 7\text{mm}$)- fialový díl
- díl č. 3 - Přítlačný kroužek ($\varnothing 38\text{mm} \times 4\text{mm}$) - žlutý díl
- díl č. 4 - Držák ($\varnothing 38\text{mm} \times 13\text{mm}$) - zelený díl



Obr. 14 Vyráběné součásti

3.1. Výroba na CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV

Veškeré součásti byly nejdříve vymodelovány v CAD programu. Následně byla navrhnutá výroba v CAD/CAM programu EdgeCAM, z něj byl vygenerován NC kód, který byl poté nahrán do stroje. V EdgeCAMu symbolizují zelené čáry rozměry polotovaru, ostatní čáry znázorňují dráhy nástroje, plné vyjadřují pracovní posuv a čárkované rychloposuv.

Před obráběním každého dílu byly provedeny následující úkony. Nejprve byl do sklíčidla upnut polotovar, byly provedeny korekce nástrojů, do stroje byla zadána velikost polotovaru a nakonec bylo spuštěno obrábění.

Jako polotovár byla zvolena tyč $\varnothing 40 \times 35$ z PMMA.

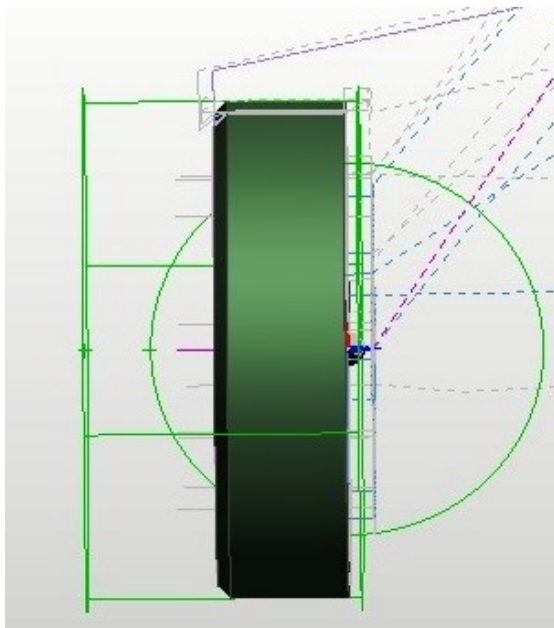
Použité stroje a nástroje:

- CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV
- Vrták 880 $\varnothing 20\text{mm}$
- Vrták HSS $\varnothing 1,6\text{mm}$
- Vrták HSS $\varnothing 3,2\text{mm}$
- Fréza válcová $\varnothing 12\text{mm}$
- Fréza kulová $\varnothing 4\text{mm}$
- Fréza válcová $\varnothing 4\text{mm}$
- Nůž kopírovací zprava-doleva
- Upichovací nůž – planžeta, pravá špička

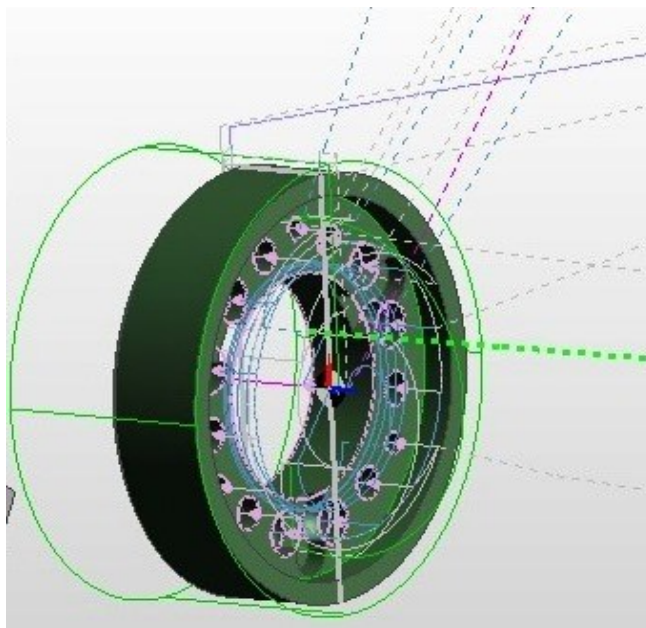
3.1.1. Výroba dílu č. 1 - Základna ($\varnothing 38\text{mm} \times 10\text{mm}$)

Zarovnání čela (kopírovací nůž)

1. Podélné hrubování (kopírovací nůž)
2. Frézování díry v ose (vrták 880 $\varnothing 20\text{mm}$, fréza válcová $\varnothing 12\text{mm}$)
3. Vrtání děr na čele (vrták HSS $\varnothing 1,6\text{mm}$, vrták HSS $\varnothing 3,2\text{mm}$)
4. Obrobení vybrání (fréza kulová $\varnothing 4\text{mm}$, fréza válcová $\varnothing 4\text{mm}$)
5. Upíchnutí (upichovací nůž)



Obr. 15 Základna pohled 1(EdgeCAM)



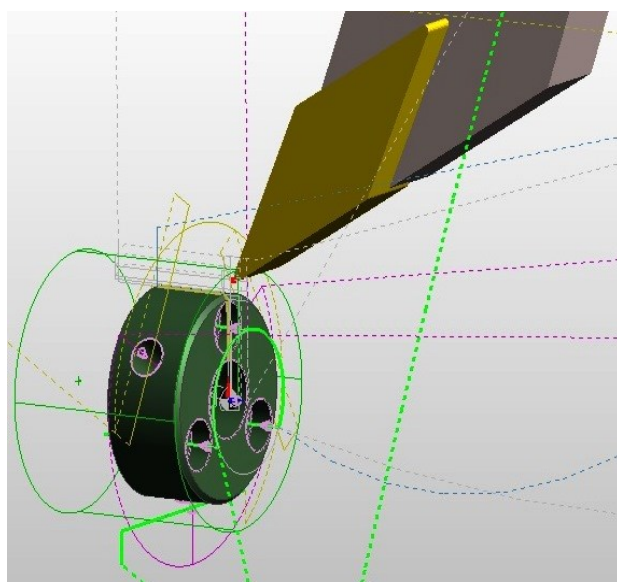
Obr. 16 Základna pohled 2(EdgeCAM)

3.1.2. Výroba dílu č. 2 - střed (Ø16mm x 7mm)

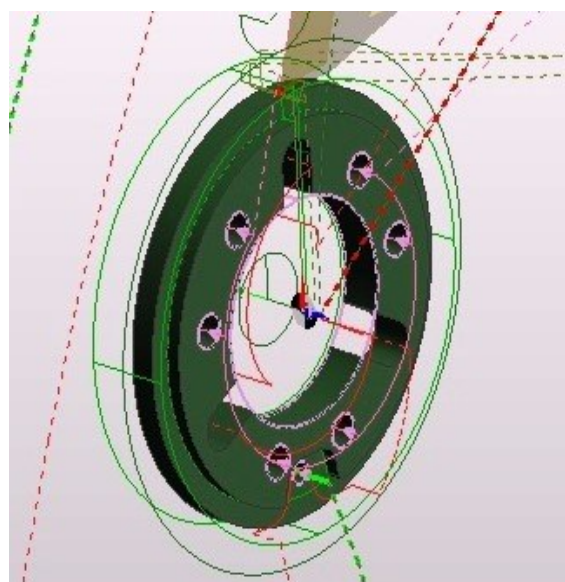
1. Frézování ploch na obvodu (fréza válcová Ø 12mm)
2. Vrtání děr po obvodu (vrták HSS Ø 3,2mm)
3. Obrábění na výsledný průměr a zarovnání čela (nůž kopírovací)
4. Vrtání otvorů na čele (vrták HSS Ø 1,6mm)
5. Frézování díry v ose (vrták HSS Ø 3,2mm, fréza válcová Ø 4mm)
6. Vyvrtání díry na čele (fréza válcová Ø 4mm)
7. Upíchnutí (upichovací nůž)

3.1.3. Výroba dílu č. 3 - Přítlačný kroužek (Ø38mm x 4mm)

1. Podélné hrubování a zarovnání čela (kopírovací nůž)
2. Vrtání díry v ose (vrták Ø 20mm)
3. Frézování obvodu a díry v ose (fréza válcová Ø 12mm)
4. Vrtání díry na čele (vrták HSS Ø 1,6mm)
5. Vrtání děr na čele (vrták HSS Ø 3,2mm)
6. Frézování vybrání (fréza válcová Ø 4mm)
7. Upíchnutí (upichovací nůž)



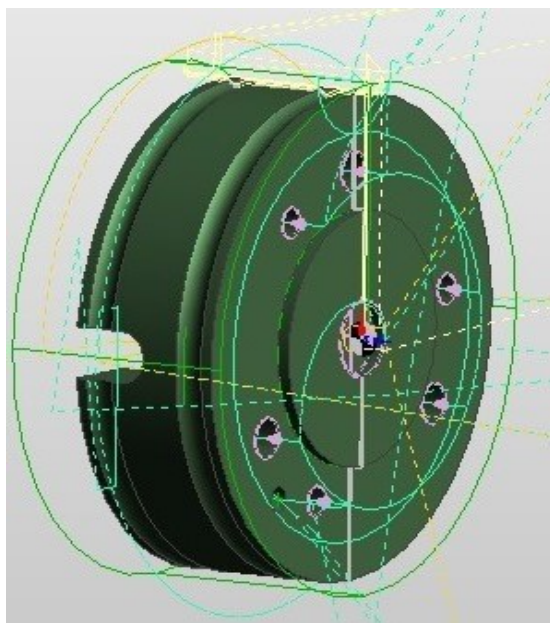
Obr. 17 Střed (EdgeCAM)



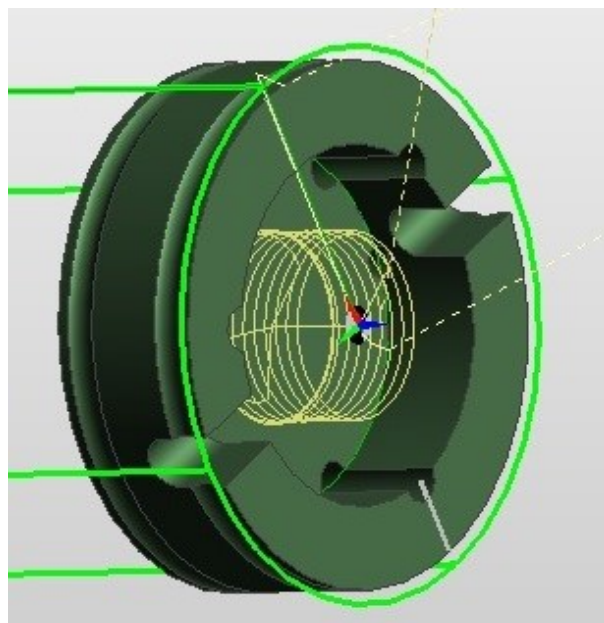
Obr. 18 Přítlačný kroužek (EdgeCAM)

3.1.4. Výroba dílu č. 4 - Držák(ø38mm x 13mm)

1. Zarovnání čela (kopírovací nůž)
2. Frézování na čele (fréza válcová ø 4mm)
3. Frézování na obvodu – zarovnání pro vrtání (fréza válcová ø 12mm)
4. Vrtání děr na obvodu (vrták HSS ø3,2mm, fréza válcová ø 4mm)
5. Frézování obvodu na čisto (kopírovací nůž)
6. Vrtání děr na čele (vrták HSS ø1,6mm)
7. Vrtání děr na čele, v ose a asymetricky (vrták HSS ø3,2mm)
8. Frézování díry v ose (fréza válcová ø 4mm)
9. Frézování drážky na obvodu (upichovací nůž)
10. Upíchnutí (upichovací nůž)
11. Upnutí obrobku z druhé strany
12. Zarovnání čela (kopírovací nůž)
13. Frézování díry v ose (fréza válcová ø 4mm)



Obr. 19 Držák 1. upnutí (EdgeCAM)



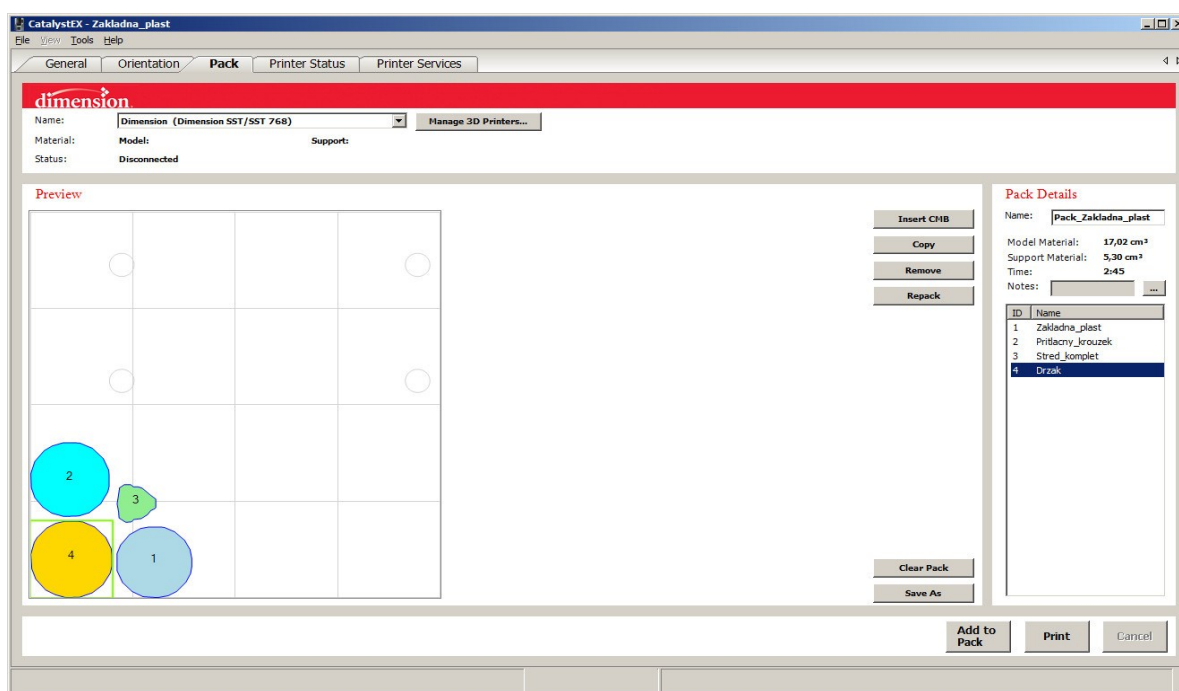
Obr. 20 Držák 2. upnutí (EdgeCAM)



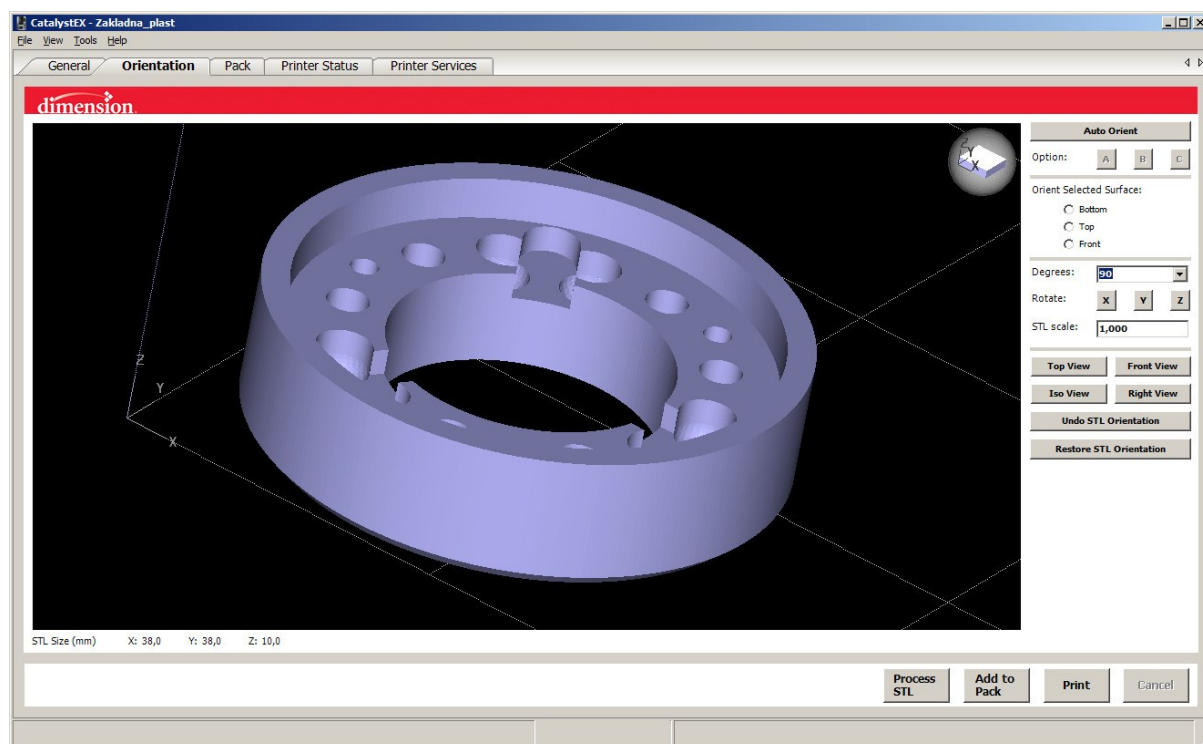
Obr. 21 Vyrobené díly (Mazak INTEGREGX 100-IV)

3.2. Výroba na Dimension STT 768

Jako výchozí program pro vkládání dat do Dimension byl použit program CatalystEX. 3D CAD modely do něj byly vloženy, program si je hospodárně rozložil na pracovní desku (obr. 22). Je třeba napolohovat jednotlivé součásti, na obrázku 23 byla zvolena tato pozice, aby nebylo potřeba použít podpůrný materiál. Sady jsou tisknuty jednotlivě.

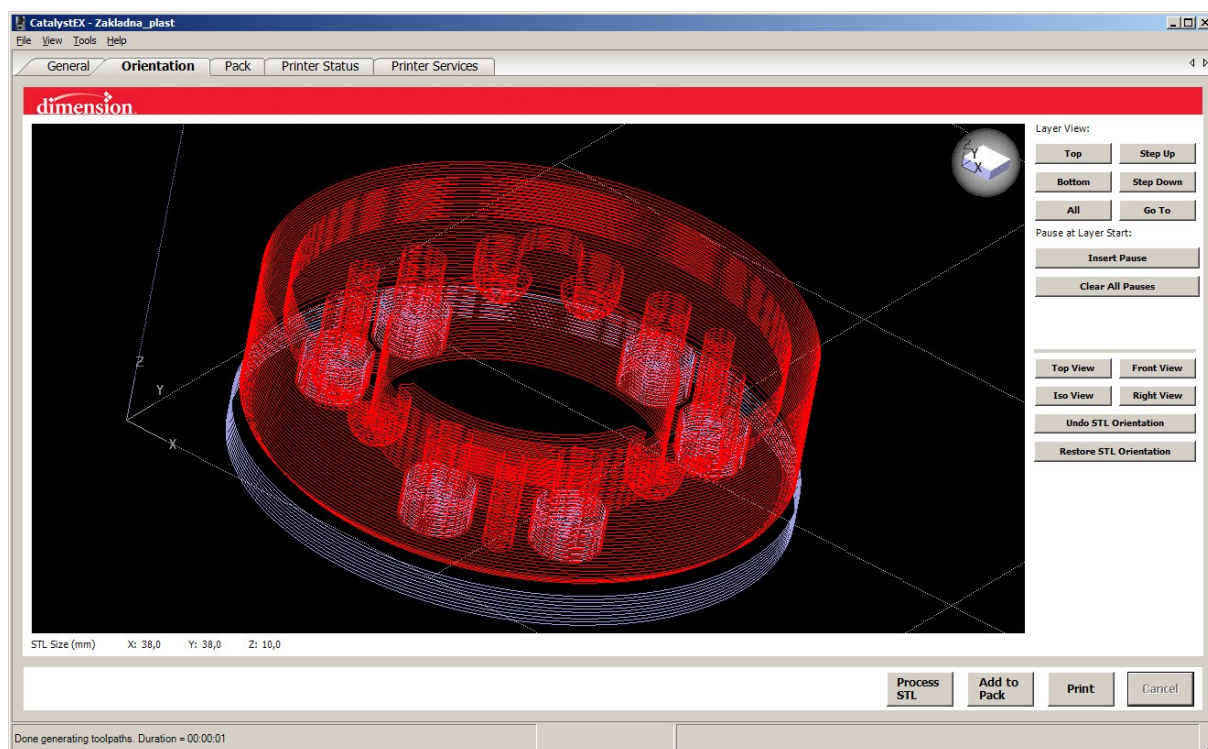


Obr. 22 Rozložení součástí

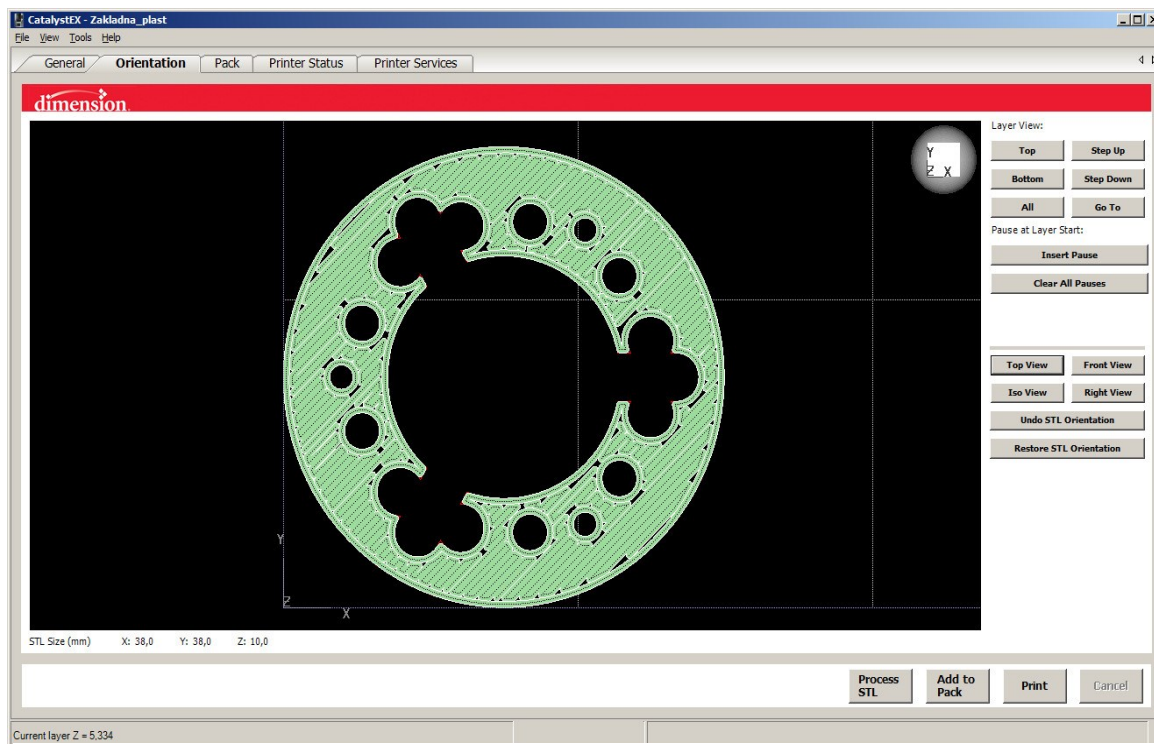


Obr. 23 Polohování součásti

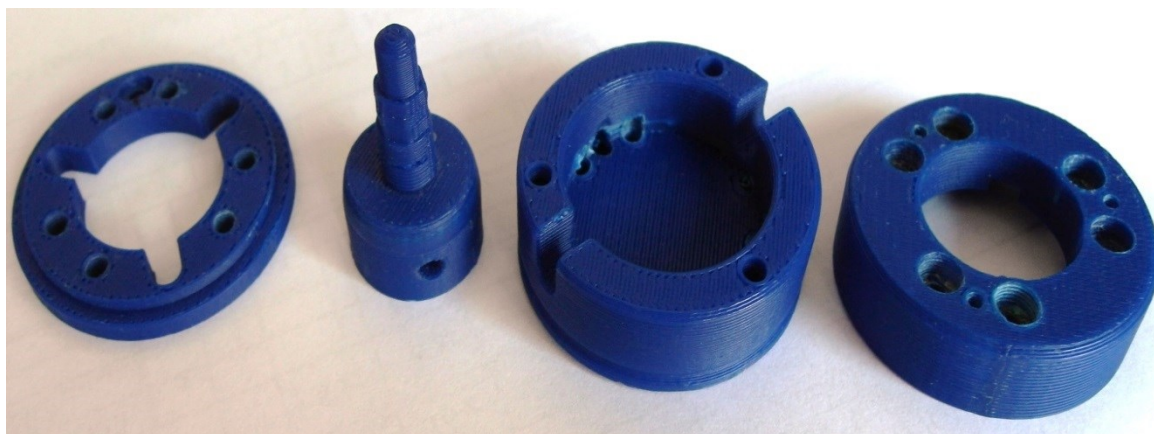
Poté program vygeneroval dráhy pro stavbu modelu a odeslal je do stroje, v programu byla před samotnou stavbou provedena její simulace.



Obr. 24 Generování dráhy



Obr. 25 Stavba dílu



Obr. 26 Vyrobené díly

3.3 Výroba na Objet Connex 500

Výroba na této 3D tiskárně proběhla obdobně jako u Dimension STT 768. Při tisku více sad součástí (3, 10) mohou být na „pracovním stole“ vytvořeny všechny sady najednou, čas na výrobu jedné sady se tím snižuje. Doba výroby jedné sady se snižuje s počtem vyrobených sad. Výroba je produktivnější, není zde lineární závislost jako u Dimension STT 768. Díly na této tiskárně nebyly vytisknuty z důvodu vysoké ceny. Pro získání dat z výroby (čas, množství materiálu) posloužila simulace v softwaru pro ovládání 3D tiskárny.

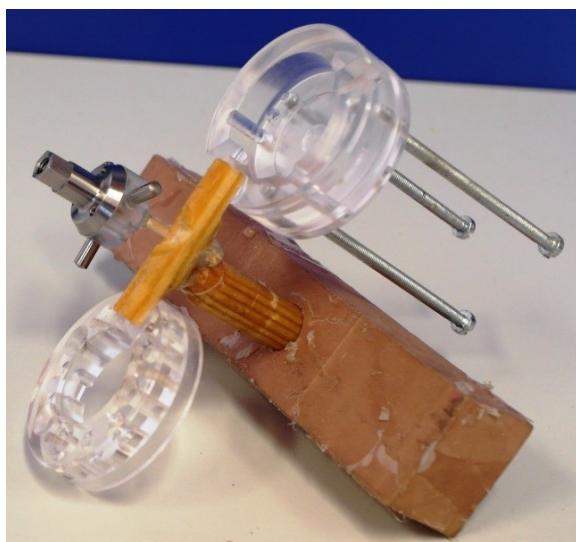
4. Příprava výroby součástí pomocí technologie odlévání dílů ve vakuu

Při této technologii byl Přítlačný kroužek (díl č. 3) a Držák (díl č. 4) vyroben jako jeden celek. Do formy byly tedy zality tři součásti.

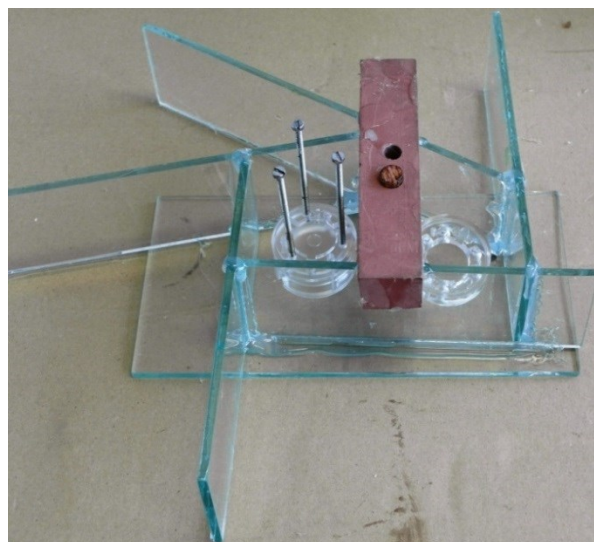
4.1 Výroba formy:

Nejprve byl vyroben rám formy, jako materiál rámu bylo použito sklo. Skleněné tabulky byly navzájem připevněny lepicí pistolí. Lepidlo a tabulky skla zajistily dostatečnou tuhost rámu. Do dílu se závity byly zašroubovány šrouby. K master modelu byla přilepena vtoková soustava, která se skládala z dřevěných komponentů (obr. 27).

Následně byl master model s vtokovou soustavou umístěn do rámu formy (obr. 28).



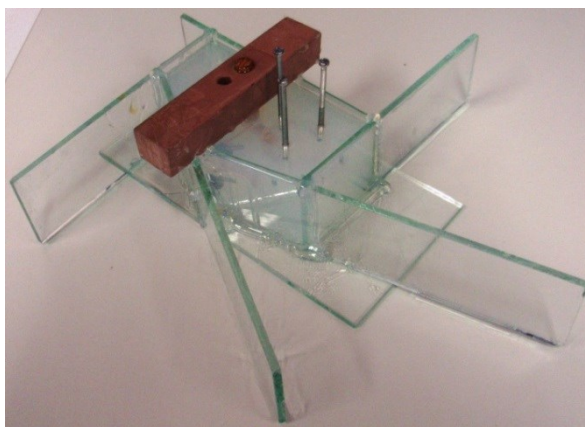
Obr. 27 Master model s vtokovou soustavou



*Obr. 28 Rám formy +
master model s vtokovou soustavou*

Mezitím byla zapnuta vakuová komora. V nádobě byl namíchán silikon, následně se vložil do vakuové komory „vakuovat“, kvůli odstranění bublinek. Vyvakuovaný silikon byl vlit do rámu formy. Protože silikon má dlouhou dobu tuhnutí, mohlo být lití vykonáno mimo vakuovou komoru. Forma se silikonem byla vložena zpět do vakuové komory a opět se spustil proces vakuování, ten byl ukončen, jakmile byly odstraněny bublinky. Forma se nechala 24h zatuhnout.

Šrouby a horní díl vtokové soustavy byly vyjmuty ze sestavy. K rozebrání formy posloužil skalpel a lidská síla. Skalpelem bylo odstraněno lepidlo ze skla, rám pak bylo možno jednoduše rozebrat.



Obr. 29 Forma s rámem a vtokovou soustavou



Obr. 30 Forma

Forma byla asymetricky rozříznuta skalpelem, zde musel být kladen důraz na správné zvolení dělicí roviny tak, aby mohla být vyjmuta vtoková soustava s master modelem. K oddělování formy byly také použity kleště, ty byly vloženy do nařízlé dělicí roviny formy, mírnou silou ji rozevřely a skalpel mohl lépe pronikat dovnitř.



Obr. 31 Dolní a horní polovina formy

Do formy bylo ještě potřeba udělat výfuky, výfuky byly vytvořeny v horní polovině formy (ze spodní poloviny by při lití mohl materiál vytéct). Výfuky by neměly být umístovány na funkční plochy součásti, aby se dosáhlo co nejkvalitnějšího povrchu. K jejich výrobě byla použita injekční jehla se zbrošeným hrotem. Pokud by hrot jehly nebyl zbrošen, nešly by výfuky vytvořit.

Do formy byly umístěny šrouby a ocelový díl podle obr. 32. Dolní a horní polovina formy byla k sobě připevněna pomocí svorek, aby bylo docíleno co největší těsnosti formy.



Obr. 32 Forma s umístěnými komponenty

4.2 Lití do formy

Forma byla vložena do pece předehřáté na 75°C, zlepší se tím zabíhavost materiálu do formy.

Forma s trychtýřem byla umístěna do vakuové komory. K následnému odlévání byl použit materiál ABS MG 805/A+B. Nejprve byly naváženy složky A a B, celkově bylo použito 40g tohoto materiálu. Složky A a B byly smíchány pomocí mechanického ovládání až ve vakuové komoře, tento materiál tuhne velice rychle (5-7min).

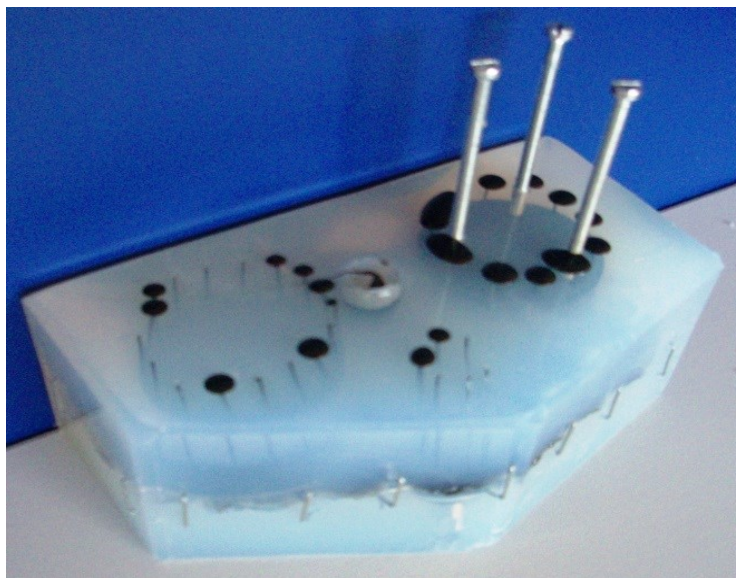
Materiál byl vyvakuován, poté smíchán pomocí metly umístěné v jedné z nádob. Směs složek A a B byla vlita do formy (obr. 33).



Obr. 33 Vakuová komora s komponenty

Forma byla po odlití vyjmuta z vakuové komory, byly odejmuty svorky a odstraněna vtoková a výfuková soustava. Pomocí brusného papíru byly na dílech dobroušeny nerovnosti po odstranění vtokové a výfukové soustavy.

Nakonec byly odlitky vloženy do temperovací pece rozeřáté na 100°C po dobu dvou hodin. Vyrobené díly jsou zobrazené na obrázku 35.



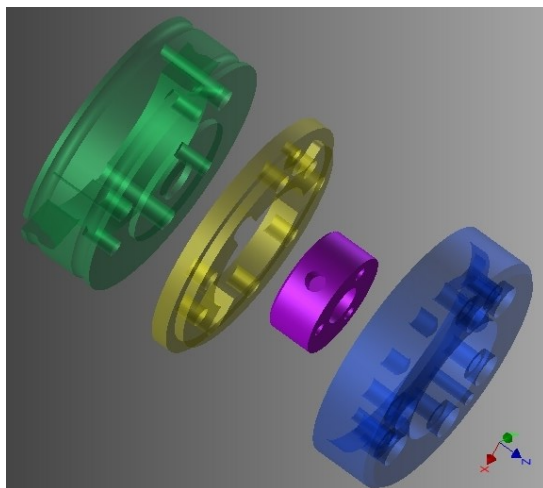
Obr. 34 Forma po zalití



Obr. 35 Odlitky

5. Porovnání všech způsobů výroby z hlediska nákladů a časové náročnosti a jejich zhodnocení.

V této kapitole bude provedeno porovnání výroby jedné, tří a deseti sad součástí na různých technologiích. Ceny jsou pouze orientační, byly určeny na základě konzultace s pracovníky Katedry výrobních systémů TUL. Hodinová sazba přípravy byla zvolena na 200Kč. Všechny uvedené ceny jsou bez DPH.



Obr. 36 Vyráběné součásti

5.1. CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV

5.1.1. Časová náročnost výroby součástí

Navrhnutí výroby v programu EdgeCAM, generování NC kódu, příprava dat a odladění výroby na stroji trvá cca 6 hodin.

Tab. 1 Čas výroby součástí na Mazak INTEGREX 100-IV

Označení dílu	1 sada	3 sady	10 sad
díl č. 1 - Základna (ø38mm x 10mm)	3,7min	11,1min	37min
díl č. 2 - Střed (ø16mm x 7mm)	11,1min	33,3min	111min
díl č. 3 - Přítlačný kroužek (ø38mm x 4mm)	4,5min	13,5min	45min
díl č. 4 - Držák (ø38mm x 13mm)	7,1min	21,3min	71min
Celkový čas obrábění	26,4min	79,2min	264min
Celkový čas výroby součástí	6h 30min	7h 20min	9h 30min

Výroba jedné sady součástí: $6\text{h} + 26,4\text{min} \doteq \mathbf{6\text{h } 30\text{min}}$

Výroba tří sad součástí: $6\text{h} + 79,2\text{min} \doteq \mathbf{7\text{h } 20\text{min}}$

Výroba deseti sad součástí: $6\text{h} + 264\text{min} \doteq \mathbf{9\text{h } 30\text{min}}$

5.1.2. Celková kalkulace výroby

Polotovary:

Příprava: $6h \cdot 200Kč = 1\,200Kč$

Materiál: PMMA (Polymethylmethakrylát – plexisklo)

Rozměry: $\varnothing 40mm \times 35mm$

Cena na 1m: $1\,955Kč \rightarrow$ Cena polotovaru: $1955 \times 0,035 = 68,45Kč \approx 70Kč$

Po započtení dalších nákladů (hodinová sazba stroje, marže, mzda obsluhy stroje, materiál...) je cena za obrábění jedné sady dílu stanovena na **1 300Kč**.

Celková cena jedné sady (včetně přípravy): $1\,200 + 1\,300 = 2\,500Kč$

Celková cena tří sad (včetně přípravy): $1200 + 3 \cdot 1\,300 = 5\,100Kč$

Celková cena deseti sad (včetně přípravy): $1\,200 + 10 \cdot 1\,300 = 14\,200Kč$

5.2. Odlévání dílů ve vakuu

Pro tuto technologii je potřeba vyrobit Master model, ten je použit k výrobě formy. Master model byl vyroben na CNC soustružnicko-frézovacím centru Mazak INTEGREX 100-IV.

5.2.1. Časová náročnost výroby součástí:

Tab. 2 Parametry výroby při odlévání dílů ve vakuu

Druh úkonu	Čas
Výroba Master modelu	6h 30min
Výroba formy: příprava, zahřátí komory, lití, práce	2h
Lití: příprava, temperace komory, lití, práce	30min
Čas výroby jedné sady součástí	9h
Čas výroby tří sad součástí	10h
Čas výroby deseti sad součástí	13,5h

Výroba jedné sady součástí: výroba master modelu + výroba formy + lití = **9h**

Výroba tří sad součástí: výroba master modelu + výroba formy + $3 \cdot$ lití = **10h**

Výroba deseti sad součástí: výroba master modelu + výroba formy + $10 \cdot$ lití = **13,5h**

5.2.2. Celková kalkulace výroby

Cena formy je stanovena na 2 400Kč, k výrobě formy byl použit master model v ceně 2 500Kč, celková cena formy je tak 4 900Kč. Cena lití jedné sady součástí je stanovena na 550Kč.

Po započtení všech nákladů (hodinová sazba stroje, marže, mzda obsluhy stroje, materiál...) je celková **cena jedné sady součástí stanovena na 5 450Kč** (Forma + odlití).

Tři sady součástí: Forma + 3*odlití = **6 550Kč**

Deset sad součástí: Forma +10*odlití= **10 400Kč**

5.3. 3D tisk na Dimension SST 768

Příprava dat v softwaru pro ovládání 3D tiskárny: 15min

Tab. 3 Parametry výroby u 3D tiskárny Dimension SST 768

	Jedna sada	Tři sady	Deset sad
Množství stavebního materiálu	17cm ³	51cm ³	170cm ³
Množství podpurného materiálu	6cm ³	18cm ³	60cm ³
Čas stavby	2h 45min	5h 30min	27h 30min
Celkový čas výroby	3h	5h 45min	27h 45min

Po započtení všech nákladů (hodinová sazba stroje, marže, mzda obsluhy stroje, materiál...) je cena jedné sady součástí stanovena na **4 500Kč**.

Celková cena jedné sady (včetně přípravy): 0,25*200 + 4 500= **4 550Kč**

Tři sady: 0,25*200 + 3*4 500 = **13 550Kč**

Deset sad: 0,25*200 + 10*4 500 = **45 050Kč**

5.4. 3D tisk Objet Connex 500

Příprava dat v softwaru tiskárny trvá 15min.

Tab. 4 Parametry výroby u 3D tiskárny Objet Connex 500

	Jedna sada	Tři sady	Deset sad
Množství stavebního materiálu	38g	120g	390g
Množství podpurného materiálu	24g	100g	338g
Čas stavby	37min	1h 19min	4h 15min
Celkový čas výroby	52min	1h 34min	4h 30min

Po započtení všech nákladů (hodinová sazba stroje, marže, mzda obsluhy stroje, materiál...) je **cena jedné sady součástí** stanovena na **5 350Kč**.

Celková cena jedné sady(včetně přípravy): $0,25 \cdot 200 + 5350 = 5\,400\text{Kč}$

Tři sady: $0,25 \cdot 200 + 3 \cdot 5\,350 = 16\,100\text{Kč}$

Deset sad: $0,25 \cdot 200 + 10 \cdot 5\,350 = 53\,550\text{Kč}$

5.5. Celkové porovnání

5.5.1 Řazení dle časové náročnosti

a) Příprava výroby

Časová náročnost přípravy výroby jedné, tří a deseti sad součástí je uvedena v tabulce 5. Pro přípravu jedné, tří nebo deseti sad je potřeba vyčlenit vždy stejný čas.

Tab. 5 Časové porovnání přípravy výroby na různých technologiích

Pořadí	Metoda	Čas
1.-2.	3D tisk. Objet Connex 500	15min
1.-2.	Dimension SST 768	15min
3.	Mazak INTEGREX 100-IV	6h
4.	Odlévání dílů ve vakuu	8h 30min

b) Výroba (obrábění, odlévání, tisknutí)

Výrobní časy jedné, tří a deseti sad součástí jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.

Tab. 6 Časové porovnání výroby jedné sady součástí na různých technologiích

Pořadí	Metoda	Čas 1 sady
1. - 2.	Mazak INTEGREX 100-IV	30 min
1. - 2.	Odlévání dílů ve vakuu	30 min
3.	3D tisk. Objet Connex 500	37 min
4.	Dimension SST 768	1h 45 min

Tab. 7 Časové porovnání výroby tří a deseti sad součástí na různých technologiích

Pořadí	Metoda	Čas 3 sad	Čas 10 sad
3.	3D tisk. Objet Connex 500	1h 19min	4h15min
1.	Mazak INTEGREX 100-IV	1h 20min	4h 30min
2.	Odlévání dílů ve vakuu	1h 30min	5h
4.	Dimension SST 768	8h 15min	27h 30min

c) Příprava a výroba

V následujících tabulkách (Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10) je seřazena časová náročnost přípravy a výroby součástí (od nejkratšího k nejdelšímu) všech porovnávaných technologií.

Tab. 8 Časové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (1 sada)

Jedna sada součástí		
Pořadí	Metoda	Čas
1.	3D tisk. Objet Connex 500	52min
2.	Dimension SST 768	3h
3.	Mazak INTEGREX 100-IV	6h 30min
4.	Odlévání dílů ve vakuu	9h

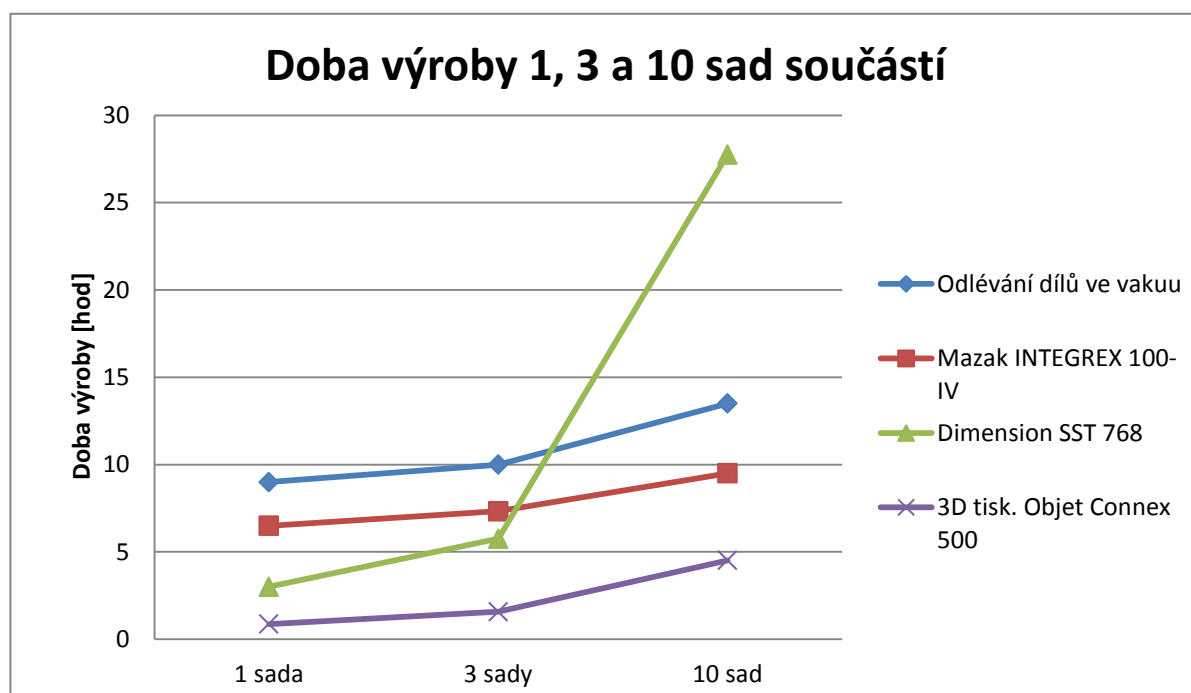
Tab. 9 Časové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (3 sady)

Tři sady součástí		
Pořadí	Metoda	čas
1.	3D tisk. Objet Connex 500	1h 34min
2.	Dimension SST 768	5h 45min
3.	Mazak INTEGREX 100-IV	7h 20min
4.	Odlévání dílů ve vakuu	10h

Tab. 10 Časové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (10 sad)

Deset sad součástí		
Pořadí	Metoda	čas
1.	3D tisk. Objet Connex 500	4h 30min
2.	Mazak INTEGREX 100-IV	9h 30min
3.	Odlévání dílů ve vakuu	13h 30min
4.	Dimension SST 768	27h 45min

V grafu (obr. 37) je znázorněna časová náročnost výroby (včetně přípravy) 1, 3 a 10 sad součástí na různých technologiích.



Obr. 37 Graf doby výroby 1, 3 a 10 sad součástí

5.5.2. Řazení dle cenové náročnosti výroby

V tabulkách 11, 12 a 13 jsou seřazené technologie podle cenové náročnosti výroby (od nejlevnější po nejdražší), z tabulek je také možno vyčíst cenu za jednu sadu součástí, která se mění s počtem vyrobených sad.

Tab. 11 Cenové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (1 sada)

Jedna sada součástí		
Pořadí	Metoda	Cena za sadu
1.	Mazak INTEGRER 100-IV	2 500 Kč
2.	Dimension SST 768	4 550 Kč
3.	3D tisk. Objet Connex 500	5 400 Kč
4.	Odlévání dílů ve vakuu	5 450 Kč

Tab. 12 Cenové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (3 sady)

Tři sady součástí			
Pořadí	Metoda	Cena	Cena za sadu
1.	Mazak INTEGRER 100-IV	5 100Kč	1 700 Kč
2.	Odlévání dílů ve vakuu	6 550 Kč	2 184 Kč
3.	Dimension SST 768	13 550Kč	4 517Kč
4.	3D tisk. Objet Connex 500	16 100Kč	5 367Kč

Tab. 13 Cenové porovnání přípravy a výroby na různých technologiích (10 sad)

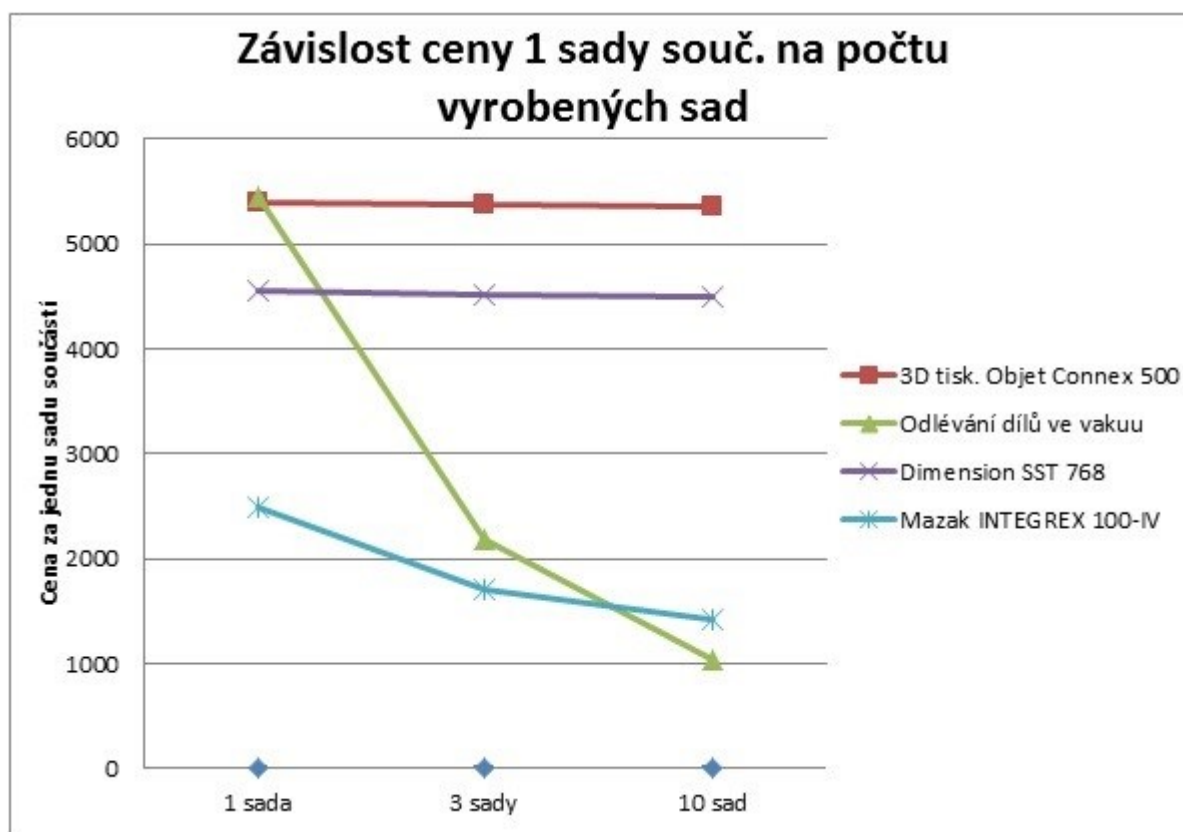
Deset sad součástí			
Pořadí	Metoda	Cena	Cena za sadu
1.	Odlévání dílů ve vakuu	10 400Kč	1 040Kč
2.	Mazak INTEGRER 100-IV	14 200Kč	1 420Kč
3.	Dimension SST 768	45 050Kč	4 505Kč
4.	3D tisk. Objet Connex 500	53 550Kč	5 355Kč

V grafu (obr. 38) je znázorněn vývoj ceny jedné sady součástí v závislosti na celkovém počtu vyrobených sad na různých technologiích.

Technologie 3D tisku jsou velmi málo náročné na přípravu (15min = 50Kč), to se projevuje téměř konstantní cenou jedné sady součástí.

Největší vliv přípravy na celkovou cenu je u technologie odlévání dílů ve vakuu, při výrobě jedné sady je tato technologie nejdražší a při výrobě deseti sad je naopak nejlevnější. Forma je velice drahá, protože je k její výrobě potřeba master model.

Snížování ceny u CNC obrábění (Mazak INTEGREX 100-IV) způsobuje časová náročnost přípravy (6h = 1 200Kč). Čím více sad vyrobíme, tím se cena přípravy může rozložit do více sad a tím cena klesá.



Obr. 38 Graf vývoje ceny jedné sady součástí

6. Závěr

Bakalářská práce se zabývala porovnáním efektivity prototypové výroby čtyř dílů na odměřovací sondu pomocí různých technologií výroby – CNC obrábění a metody Rapid Prototyping – odlévání dílů ve vakuu, 3D tiskárny Objet Connex 500 a Dimension SST 768.

Byly navrženy výrobní postupy pro dané součásti a následně provedena jejich výroba.

Závěrečné srovnání se zabývalo výrobou jedné, tří a deseti sad součástí na různých technologiích. Výroba jedné sady součástí (včetně přípravy) je nejrychlejší na 3D tiskárně Objet Connex 500 (52min), cena je však vysoká (5 400Kč). Nejlevnější technologií je CNC obrábění (2 500Kč) s časem takřka osmkrát horším (6h 30min).

Výroba tří sad součástí (včetně přípravy) je opět nejrychlejší na 3D tiskárně Objet Connex 500 (1h 34min), jedna sada vyjde na 5 367Kč. Nejlevnější technologií je opět CNC obrábění (1 700Kč) s časem stále nelichotivým (7h 20min).

Deset sad součástí je nejrychleji vyrobeno (včetně přípravy) opět 3D tiskem na Objet Connex 500 (4h 30min), cena jedné sady je 5 355Kč. Nejlevnější variantou je odlévání dílů ve vakuu, kdy jedna sada vyjde na 1 040Kč, všech deset sad součástí je vyrobeno za 13h 30min.

Pro výrobu jedné sady součástí je patrně nejvhodnější použít CNC obrábění, je nejlevnější a vyrobené součásti jsou z používaných technologií nejvíce kvalitní.

Podobný výsledek platí i pro výrobu tří sad součástí, CNC obrábění je stále nejlevnější, cena jednoho kus klesla o cca 30%.

Pro výrobu deseti sad součástí je nejvýhodnější použít technologii odlévání dílů ve vakuu, která je cenově nejméně náročná, jedna sada vychází cca o 30% levněji než u CNC obrábění.

Součásti vyrobené CNC obráběním a odléváním dílů ve vakuu vykazovaly nejlepší kvalitu povrchu, mají také lepší pevnost a tvarovou stálost než výrobky z 3D tiskáren.

7. Literatura

- [1] Frezovani-5os [online]. 2010 [cit. 2013-03-03].
Dostupné z: <http://www.frezovani-5os.cz/metody-frezovani/5-os-polohovani/>
- [2] Renishaw [online]. 2010 [cit. 2013-03-14].
Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/sondy-pro-obrabeci-stroje-jejich-nastaveni-a-kontrolu-obrobku--6075>
- [3] Frezovani-5os [online]. 2010 [cit. 2013-01-13].
Dostupné z: <http://www.frezovani-5os.cz/metody-frezovani/5-os-souvisle/>
- [4] Keller, P.: Programování a řízení CNC strojů. Prezentace přednášek, 2.část. Liberec 2005
- [5] Horáček, M.: 7. výukový modul - Rapid Prototyping. VUT v Brně. [cit. 2013-04-20].
Dostupné z: http://esf.fme.vutbr.cz/aktivita/akt-05/mod-07/rp_prehled.pps
- [6] Šafka, J.: Objet Connex 500
- [7] *Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem*. Brno, 2007. [cit. 2013-04-10].
Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=363 .
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Paloušek.
- [8] Katedra výrobních systémů TUL: Seřizování nástrojů na CNC Mazak Integrex 100 – IV. Liberec
- [9] Keller, P.: The introduction to machining centre Mazak INTEGREX 100-IV. Liberec.
- [10] Tenlinks. [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupné z:
http://www.tenlinks.com/news/PR/Planit_holdings/gfx/052411_edgcam2011_r2.jpg
- [11] Stratasys. [online]. [cit. 2013-04-16]. Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/precision/objet-connex500>
- [12] Xpress3d. [online]. [cit. 2013-01-30].
Dostupné z: <http://www.xpress3d.com/FDM.aspx>
- [13] KVS. [online]. [cit. 2013-05-20].
Dostupné z: <http://www.kvs.tul.cz/rapid>

8. Přílohy

- 1) Zdrojové soubory CAD/CAM dat návrhu výroby na CD